



高速ディスプレイによる継時加法混色を用いた 視線移動依存型視線誘導手法の提案

奈良雅大¹⁾, 宮崎竜輔¹⁾, 廣井裕一²⁾, 平木剛史^{2,3)}, 伊藤勇太⁴⁾, 宮藤詩緒¹⁾

1) 東京科学大学 情報理工学院 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1,
{nara.m.d7f5, miyazaki.r.a5eb, miyafuji.s.7e2b}@m.isct.ac.jp)

2) クラスター メタバース研究所 (〒 141-0031 東京都品川区西五反田 8-9-5, y.hiroi@cluster.mu)

3) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp)

4) 東京大学大学院情報学環 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yuta.itoh@iii.u-tokyo.ac.jp)

概要:

視線誘導はユーザの注意を特定の領域に向ける上で不可欠だが、従来手法は持続的な視覚的ノイズで集中を妨げる。そこで視線移動時のみ現れる視線誘導を提案する。本手法は継時加法混色手法を応用し、視線誘導パターンを埋め込んだ画像を高速表示することで、注視中は不可視だが、視線移動時だけ知覚される視線誘導を実現する。本手法により、視線計測器等のセンサ装置不要でユーザの集中を妨げず効果的に視線誘導が可能となる。

キーワード: 視線誘導, 継時加法混色, 視覚, 拡張現実感

1. はじめに

視線誘導技術は、ユーザの注意を自然かつ効率的に特定の領域へと導く手法として注目されている。しかし、視線誘導技術は誘導効果の向上と視覚的干渉の低減という本質的なトレードオフに直面している。従来の矢印や丸枠などの明示的な注釈は確実な誘導効果を示す一方で、主要なコンテンツを妨げる視覚的ノイズを生み出す。

理想的な視線誘導は、視覚的干渉を最小限に抑えつつ、必要なタイミングで的確に誘導を提供することである。視覚的干渉を抑える方法として、色やコントラスト [1]、フリッカや色振動 [2] を用いて顕著性を操作する方法が研究されてきた。しかし、これらの方法は場面外観を継続的に変更させるため、必要なタイミングに限り誘導を提供するには至っていない。一方で、視線計測器を用いて適切なタイミングで視線を誘導する方法 [3] も提案されているが、視線計測器には設置の煩雑さ、マルチユーザ対応の困難さ、プライバシーの懸念といった実用上の課題が存在する。

一方、近年は高フレームレートのディスプレイ表示技術の発展により、注視対象や観察者に動きが生じた時のみパターンが可視化される手法が開発されている [4, 5]。本研究ではこの手法を応用し、ユーザの視線移動時にのみ一時的に出現する視線誘導手法を提案する。

2. 提案手法

本研究では、継時加法混色と高速ディスプレイ表示技術を応用し、誘導パターンの色位相を局所的にシフトさせることで、視線固定時には見えず、視線移動時のみ一時的に出現する誘導パターンを実現する。これにより、視線が移



図 1: 提案手法概要: (a) 手法コンセプト: (左) 視線静止時は元画像が見える (右) 視線動作時には元画像上に視線誘導パターンが見え、ユーザの視線が誘導される。(b) カメラを動かしながら本手法を用いた表示を撮影した様子。

動した時のみ誘導パターンが知覚され、表示画像に対する干渉を最小限に抑えながら効果的な誘導を提供できる。

提案手法の処理フローは次の通りである (図 2)。まず元画像から 4 枚のサブフレームを生成し、パターン領域のみ色位相を 90° シフトして埋め込む。次に、これらのサブフレームを高速で循環表示することで、視線が静止している間は元画像のみが知覚され、視線移動時には誘導パターンが出現する。

次項より、ユーザの視線移動時にのみ一時的に出現する視線誘導を実現するためのパターン埋め込みアルゴリズム、視線移動時に最適化された投影周波数およびコントラスト特性を有するパターン設計について述べる。

2.1 継時加法混色とカラーレイキング効果

デジタルカラー表示には、RGB サブピクセルを同時に観察する並置加法混色 (SCM) と、主色を時間順次で提示する継時加法混色 (TCM) の 2 つの方式が存在する。LCD や OLED ディスプレイは SCM 方式に分類されるため、残像

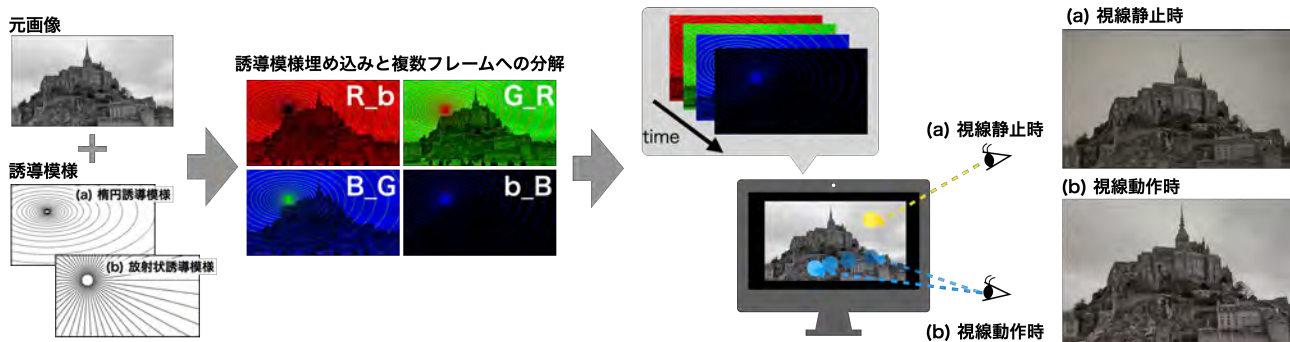


図 2: 提案手法の概要：元となる画像に対して視線誘導模様を生成し、色別に分割することでサブ画像を作成する．これらのサブフレームを高速ディスプレイで循環表示すると、視線が注視状態にある間は元の画像だけが見え、視線を素早く移動させた瞬間にのみ誘導模様が一時的に現れる．

効果によるカラーブレイキング（連続フレームが網膜上で正確に重ならない場合に、本来は単一色に平均化されるべき画像エッジが鮮明な色縁として知覚される現象）は発生しない．

本手法では、市販の OLED パネル上でカラーブレイキング効果を意図的に誘発する．具体的には、入力画像を Red, Green, Blue, black の 4 つのサブフレーム (RGBb) に分解し、これらを高速に順次表示することで TCM を実現する．

2.2 位相シフト変調による選択的可視化

本手法では、画像のパターン表示領域と非表示領域で色位相をずらすことで、カラーブレイキングを起こした時にパターンのエッジが現れるように設計する (図 2)．視線が静止している場合、網膜上での時間積分により 4 フレームが平均化され、位相のオフセットは完全に不可視となる．これにより、観察者には元画像のみが知覚され、誘導パターンは一切認識されない．一方で、視線が移動すると、網膜像が急速に移動するため、パターン境界で連続フレームが網膜上で正確に重ならなくなる．この結果、異なる位相にある隣接ピクセルが一時的に対立色ペア（例：Red-Blue）を表示し、高コントラストな色分離輪郭を生成する．色分離の強度は隣接位相間の色差に比例するため、本手法では位相間コントラストを最大化することで、固視時には完全に不可視でありながら、急速な視線移動時にのみ確実にエッジが出現する設計を実現している．

色サイクル C を $C = (\text{Red}, \text{Green}, \text{Blue}, \text{black})$ とし、 C の各要素を c_0, c_1, c_2, c_3 とする．位相関数 $\phi(x, y)$ を以下のように定義する：

$$\phi(x, y) = \begin{cases} 0 & M(x, y) = 0 \quad (\text{非パターン領域}) \\ 1 & M(x, y) = 1 \quad (\text{パターン領域}), \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 M は 2 値マスクであり、 $\phi(x, y) = 1$ は 90° 位相オフセットを意味する．フレームインデックス $k \in \{0, 1, 2, 3\}$ に対して、ピクセル (x, y) で表示される色を $F_k(x, y) = c_{(k+\phi(x, y)) \bmod 4}$ とする．この結果、非パターン領域では (c_0, c_1, c_2, c_3) 、パターン領域では (c_1, c_2, c_3, c_0) の順序で映像が提示されるが、時間平均すると両領域は光学的に等価

となる．

2.3 誘導パターン設計

視線移動の方向性と効果を考慮し、(a) 楕円パターンと (b) 放射パターンの 2 種類の誘導パターンを設計した (図 2 右下)．楕円パターンは、ターゲットに近づくほど隣接する楕円間の間隔が減少し、空間周波数が高くなる設計により、ターゲット近傍でのパターン顕著性を向上させる．視線がターゲットに向かって移動するとき、網膜像が楕円境界を直交して通過するため、エッジの顕著性が最大化される．放射パターンは、ターゲットから全方向に放射状に延びる等角線で構成される．視線がターゲットに近づくにつれて線間距離が縮小し、顕著性が増加する．このパターンは、視線移動方向がターゲット方向に対して直交する場合に最も知覚されやすい特性を持つ．すなわち、視線運動が線に平行ではなく、複数の放射線を横切る際に効果的である．

2.4 システム実装

OLED ディスプレイ (INZONE M10S QHD, Sony) を用いて提案手法を実装した．リフレッシュレートはフリッカの抑制とパターン顕著性のバランスを考慮し設定する必要がある．高リフレッシュレートはフリッカを抑制するが、各フレームの持続時間が短くなり、誘導パターンの顕著性が低下する．2 フレーム刺激の臨界フリッカ融合周波数 (CFFF) が約 50-90 Hz [6] であることを考慮すると、4 フレームシーケンスの周期は $1/(4f) < 1/\text{CFFF}$ を満たすことを要求する．すなわち $f > 360$ Hz である．予備実験の結果、閾値を十分に上回る 480 Hz が採用された．

予備実験では複数の周波数とパターンの組み合わせで視認性を検証し、この設定下で参加者がフリッカを知覚しないことを確認した．

3. 実験評価

3.1 実験設計

提案手法の有効性を検証するため、比較実験を実施した．実験では以下の 4 つの表示条件を設定した：

- (1) 誘導なし、(2) ターゲットを明示的に黒丸で囲う従来手法、(3) 楕円パターン、(4) 放射パターン．

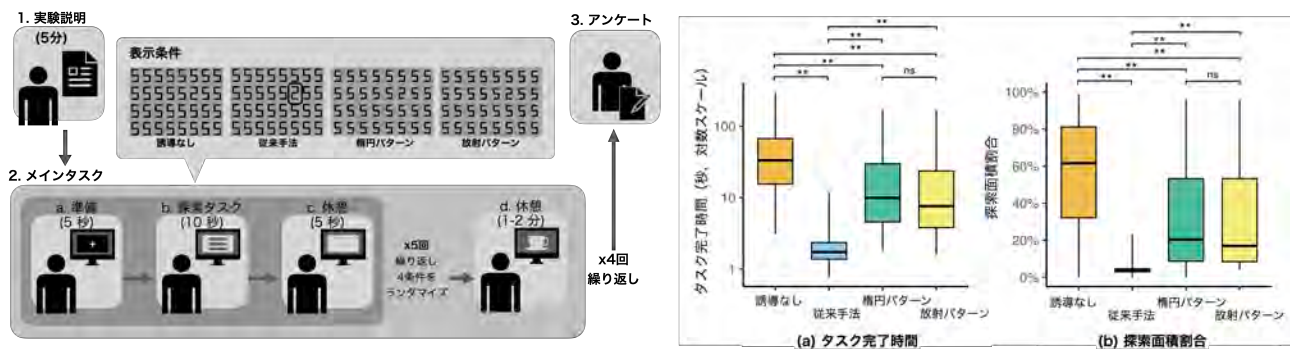


図 3: 実験概要と結果: (左) 実験手順, (右) 実験結果: (a) タスク完了時間, (b) 探索面積

刺激は 18×43 の格子状に配置された数字「5」の中に、単一の「2」が配置された視覚探索課題を用いた。各試行は以下の手順で実施された: (1) 黒背景上の白い十字を3秒間注視し、視線を安定化させる。 (2) 4つの誘導条件のいずれかで探索課題が表示され、参加者は「2」を発見した際にスペースキーを押下する。 (3) 網膜残像を防ぐため、次の試行前に灰色画面を表示する。5試行を1セットとし、参加者は4セット (約20分) を完了し、セット間には1-2分の休憩を挟んだ。

1セットのうち1つのタスクは意図的に誤った位置への誘導を行った。これらのデータは統計分析から除外した。

3.2 実験手順

24名 (男性15名, 女性8名, 無回答1名, 平均年齢23.4歳) が実験に参加した。全参加者は正常またはそれに準じる視力を有しており、1000円の報酬を受け取った。実験は東京科学大学人を対象とする倫理審査委員会の承認を得て実施された。

参加者は顎台に顎を乗せて頭部を固定し、530 mm 離れた位置に設置されたディスプレイの中央に視線を合わせた。

実験は以下の手順で実施された:

- 1. 説明** 実験の説明を行い、タスク中に使用するユーザーインターフェースの操作を確認した。
- 2. メインタスク** 顎台に頭部を固定し、視線追跡システムのキャリブレーションを実施した。その後、視覚探索タスクを実行した。
- 3. アンケート** 各誘導条件下で再度タスクを実行後、アンケートに回答した。

定量的評価として、タスク完了時間と視線移動を記録した。視線情報の記録にはアイトラッカーデバイス (GP3, Gaze-point) を用いた。定性的評価として、参加者にリッカート尺度による各条件に対する自然さと煩わしさの評価、および自由記述コメントを求めた。条件の提示順序はカウンタバランスを考慮して選択された。

3.3 実験結果

3.3.1 タスク完了時間

図3 (右 (a)) に4つの表示条件におけるタスク完了時間を示す。Friedman 検定の結果、表示条件の主効果が有意で

あった ($\chi^2 = 52.250, p < 0.01$)。事後検定として Holm 法による Wilcoxon 符号順位検定を実施した結果、誘導なし条件のタスク完了時間は、楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.71$)、放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.54$)、明示条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.87$) よりも有意に高かった。従来条件は楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.87$) および放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.87$) よりも有意に低い値を示した。一方、楕円条件と放射条件の間に有意差は認められなかった ($p = 0.94$, Cohen's $r = 0.02$)。

3.3.2 探索領域の割合

視線追跡データを用いて、視線により探索された画像領域の割合を算出した。固視時の中心視野 (視角5度以内) を探索領域として定義し、総探索面積を総画像面積で除して割合を求めた。図3 (右 (b)) に結果を示す。

Friedman 検定の結果、表示条件の主効果が有意であった ($\chi^2 = 46.85, p < .001$)。事後検定の結果、Baseline 条件の探索領域割合は、従来条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.875$)、楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.642$)、放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.63$) よりも有意に高かった。従来条件は楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.875$) および放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.869$) よりも有意に低い値を示した。楕円条件と放射条件の間に有意差は認められなかった ($p = 0.64$, Cohen's $r = 0.163$)。

3.3.3 エラー発生率

従来方法による誤誘導を含む試行で、4名の参加者が妨害刺激を注視し、それをターゲットと誤認してボタンを押すエラーが発生した。それ以外の条件ではエラーは観察されなかった。

3.3.4 主観評価結果

図4に自然さと煩わしさに関するアンケート結果を示す。

自然さ Friedman 検定の結果、条件間の主効果が有意であった ($\chi^2(3) = 41.10, p < 0.001$)。事後検定の結果、Baseline 条件の評価は従来条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.877$)、楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.769$)、放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.743$) よりも有意に高かった。従来条件は楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.689$) および放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.729$) よりも有意に低い評価を受

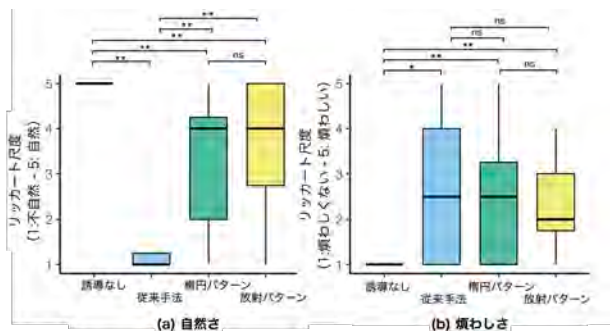


図 4: 実験アンケート結果：(a) 自然さ (b) 煩わしさ

けた。楕円条件と放射条件の間に有意差は認められなかった ($p = 0.153$, Cohen's $r = 0.291$)。

煩わしさ Friedman 検定の結果、条件間の主効果が有意であった ($\chi^2(3)=20.46, p < 0.01$)。事後検定の結果、Baseline 条件の評価は従来条件 ($p = 0.03 < 0.05$, Cohen's $r = 0.612$)、楕円条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.733$)、放射条件 ($p < 0.01$, Cohen's $r = 0.71$) よりも有意に低かった。従来条件と楕円条件 ($p = 0.875$, Cohen's $r = 0.0322$)、従来条件と放射条件 ($p = 0.620$, Cohen's $r = 0.101$)、楕円条件と放射条件 ($p = 0.470$, Cohen's $r = 0.148$) の間に有意差は認められなかった。

3.4 考察

提案手法条件下でのタスク完了時間は誘導なし条件と比較して有意に短縮した (図 3 右 (a), 事後検定 $p < .001$)。同時に、参加者が探索した画像領域の割合も有意に減少し、視線探索経路の効率の向上を示した。これらの結果は、提案手法が視線移動を適切に誘導し、全体的な探索時間を短縮することを示している。

アンケート分析により、参加者が提案手法を従来の明示的誘導よりも自然と感じることが示された。しかし、煩わしさについては提案手法と従来手法の間に有意差は検出されなかった。従来条件では 4 名の参加者が誤誘導によりターゲットを誤認してボタンを押下したのに対し、提案手法では誤反応は発生しなかった。これは従来手法に伴う視覚的妨害が誤反応を誘発しうる一方で、提案手法はそのリスクを低減する可能性を示唆する。さらに、一部の参加者は提案手法の誘導パターンに最初は気づかなかったと回答しており、提案手法が不要な視覚的ノイズを広範囲に及ぼさないことを示唆している。

これらの実験結果から、本手法が従来の明示的な誘導手法と比較して、視覚的妨害を抑えつつ、効果的な視線誘導を実現することが実証された。特に、視線移動時のみ出現する間欠的性質により、固視時の視覚的品質を維持しながら必要な誘導効果を提供することが示された。

4. おわりに

本研究では、視線移動時のみ一時的に出現する視線誘導手法を提案した。480 Hz ディスプレイ上で 4 フレーム色

サイクルに位相シフトパターンを埋め込み、継時加法混色を利用することで、固視時には不可視でありながら、視線移動時のみ鮮明な輪郭として一時的に出現する視線誘導パターンを実現した。本手法は持続的な視覚的ノイズを生じさせず、視線追跡ハードウェアを必要としない。

実験評価により、視覚探索タスクにおいて、提案手法が誘導なし条件と比較して有意にタスク完了時間を短縮し、より効率的な視線軌跡を実現することが実証された。また、従来の明示的表示手法と比較して、自然さの評価が向上した。したがって、提案手法は効果的な視線誘導と視覚的妨害の抑制の両立が可能であることを示している。

本手法は、ユーザインタフェースやパブリックディスプレイなど、専用ハードウェアなしに拡張性のある注意誘導が必要とされる分野に対する新たな選択肢を提供する。今後は、多様な表示技術への適用や、動的コンテンツに対応した適応的パラメータ調整などに取り組む。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25K03164, 24KK0187, JST さきがけ JPMJPR23I9 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kayo Azuma and Hideki Koike. A study on gaze guidance using artificial color shifts. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '18*, 2018.
- [2] Rinto Tosa, Shingo Hattori, Yuichi Hiroi, Yuta Itoh, and Takefumi Hiraki. Chromagazer: Unobtrusive visual modulation using imperceptible color vibration for visual guidance. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 31(5):3450–3458, March 2025.
- [3] Reynold Bailey, Ann McNamara, Nisha Sudarsanam, and Cindy Grimm. Subtle gaze direction. *ACM Trans. Graph.*, 28(4), September 2009.
- [4] Shio Miyafuji, Arisa Kohtani, and Hideki Koike. Motion-aware image interaction using temporal additive color mixing and high-speed projection. In *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '25*, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [5] Arisa Kohtani, Shio Miyafuji, Keishiro Urakaki, Hidetaka Katsuyama, and Hideki Koike. Mosion: Gaze guidance with motion-triggered visual cues by mosaic patterns. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '24*, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [6] Natalia D. Mankowska, Anna B. Marcinkowska, Monika Waskow, Rita I. Sharma, Jacek Kot, and Pawel J. Winkowski. Critical flicker fusion frequency: A narrative review. *Medicina*, 57(10), 2021.